

INŻYNIERIA i BUDOWNICTWO

12
2020

ISSN 0021-0315

MIESIĘCZNIK POLSKIEGO ZWIĄZKU INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW BUDOWNICTWA



PRACE BADAWCZE | PROJEKTY KRAJOWE I MIĘDZYNARODOWE | EKSPERTYZY OBIEKTÓW BUDOWLANYCH
| BADANIA WYROBÓW, MATERIAŁÓW I KONSTRUKCJI BUDOWLANYCH W AKREDYTOWANYM ZESPOLE
LABORATORIÓW BADAWCZYCH | INNOWACJE I UPOWSZECHNIANIE WIEDZY | EUROPEJSKIE OCENY TECHNICZNE,
KRAJOWE OCENY TECHNICZNE I REKOMENDACJE TECHNICZNE | CERTYFIKACJA NA CAŁYM ŚWIECIE



BEZPIECZEŃSTWO



JAKOŚĆ



TRWAŁOŚĆ



ŚRODOWISKO



KOMFORT

INŻYNIERIA i BUDOWNICTWO

Rok LXXVI (rok założenia 1938)

WARSZAWA, GRUDZIEŃ 2020



Miesięcznik
POLSKIEGO ZWIĄZKU
INŻYNIERÓW
I TECHNIKÓW
BUDOWNICTWA

12/2020

SPIS TREŚCI

strona

R. Geryło – 75 lat Instytutu Techniki Budowlanej . . .	563
Jubileusz 90-lecia urodzin Profesora <i>Andrzeja Marka Brandta</i>	565
W. Radomski – Laudacja z okazji 90-lecia urodzin Profesora <i>Andrzeja Marka Brandta</i>	566
Redakcja – Jubileusz 90-lecia urodzin Profesora <i>Andrzeja Jarominiaka</i>	568

GEOTECHNIKA

B. Kłosiński – Jak wdrożono pale wielkośrednicowe?	571
---	------------

MOSTY

A. Jarominiak – Problemy napraw i wzmocnień żelbetowych podpór mostowych	580
J. Biliszczuk, R. Toczkiwicz – Most przez Cieśninę Kerczeńską	591
B. Wichtowski, K. Konecki – Rozkład naprężeń w stalowym złączu doczołowym z jednostronnymi nakładkami rombowymi określony metodą elementów skończonych	594

ZAGADNIENIA KONSTRUKCYJNE I MATERIAŁOWE

R. Nowak, R. Orłowicz, W. Bespałow – Wybrane zagadnienia nośności i wzmocnienia ceglanych łuków i sklepień	600
---	------------

TEORIA I BADANIA NAUKOWE

I. Wójcik-Grząba – Numeryczna symulacja wznoszenia konstrukcji przekryć cięgnowych	603
---	------------

KONFERENCJE NAUKOWE

W. Drozd – Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB w Krynicy	606
M. Salamak – infraBIM 2020 V4 Expo & Multi-Conference. Najważniejsze wydarzenie BIM w Europie Środkowo-Wschodniej	607

RECENZJE	593, 608
---------------------------	-----------------

INFORMACJE

Spis treści rocznika 2020 „Inżynierii i Budownictwa”	609
Recenzenci współpracujący z redakcją „Inżynierii i Budownictwa”	612

Tematyka czasopisma

Ogólne problemy budownictwa i inżynierii lądowej, teoria konstrukcji, kształtowanie, wspomaganie komputerowe, projektowanie, realizacja, diagnostyka i utrzymanie obiektów budowlanych, inżynierskich i specjalnych, w tym mostów, budowli podziemnych i komunalnych, badania materiałów, elementów i konstrukcji, fizyka budowli, geotechnika, normalizacja, jakość i certyfikacja, kształcenie kadr oraz aktualne sprawy środowiska budowlanego.

Artykuły są recenzowane. Za publikację w czasopiśmie naukowym „Inżynieria i Budownictwo” uzyskuje się 5 punktów (Rozporządzenie MNIŚW z 22.02.2019 r. w sprawie ewaluacji jakości działalności naukowej).

Wydawca

Fundacja PZITB Inżynieria i Budownictwo 00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14
Przewodniczący Rady Fundacji prof. dr hab. inż. Kazimierz Flaga, dr h.c. multi

Redakcja

00-637 Warszawa, Al. Armii Ludowej 16, **pokój 626A**
Politechnika – Wydział Inżynierii Lądowej, tel./fax 22-629-69-86.
e-mail: pztibinżynieria@neostrada.pl www.inzynieriaibudownictwo.pl
redakcja@inzynieriaibudownictwo.pl www.zgpzib.org.pl

Kolegium Redakcyjne

Redaktor naczelna prof. dr hab. inż. Hanna Michalak, **zastępca redaktora naczelnego** dr inż. Stefan Pyrak, **sekretarz redakcji** mgr inż. Monika Kubisiak, **redaktorzy tematyczni**: prof. dr hab. inż. Marian Giżejowski, dr hab. inż. Aniela Glinicka – prof. PW, prof. dr hab. inż. Stanisław Kuś – dr h.c., prof. dr hab. inż. Czesław Miedziński, mgr inż. Piotr Rychlewski, prof. dr hab. inż. Anna Siemińska-Lewandowska, prof. dr hab. inż. Tadeusz Urban, prof. dr inż. Wojciech Włodarczyk, **redaktor językowy** mgr Barbara Gluch, **redaktor statystyczny** prof. dr inż. Wojciech Włodarczyk. **Współpracują**: prof. dr hab. inż. Piotr Noakowski (Niemcy), prof. dr inż. Andrzej Nowak – dr h.c. (USA).

Rada Programowa

Prof. dr hab. inż. Anna Halicka (**przewodnicząca**), prof. dr hab. inż. Jan Bień (**wiceprzewodniczący**), prof. dr hab. inż. Wiesław Buczkowski, dr hab. inż. Magdalena Dobiszewska (**sekretarz**), dr hab. inż. Jacek Domski, prof. PK, prof. dr hab. inż. Kazimierz Furtak, dr inż. Roman Gaćkowski, dr hab. inż. Barbara Goszczyńska, prof. PŚk, prof. dr hab. inż. Kazimierz Gwizdała, prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda, prof. dr hab. inż. Aleksander Kozłowski, dr hab. inż. Jolanta Prusiel, prof. PB, dr inż. Teresa Rucińska, prof. dr hab. inż. Leonard Runkiewicz (**wiceprzewodniczący**), prof. dr hab. inż. Adam Zybura.

Warunki prenumeraty

Zamówienia prenumeraty w wersji elektronicznej należy składać na jednym z wymienionych portali:

www.e-kiosk.pl (http://www.e-kiosk.pl/inzynieria_i_budownictwo),
www.egazety.pl (<https://www.egazety.pl/fundacja-pzib-wydanie-inzynieria-i-budownictwo.html>),
www.nexto.pl (http://www.nexto.pl/e-prasa/inzynieria_i_budownictwo_p132009.xml)

Cena rocznej prenumeraty w wersji elektronicznej wynosi 125,40 zł (z VAT), cena 1 wydania w wersji elektronicznej 10,45 zł (z VAT).

* * *

Zamówienie prenumeraty w tradycyjnej, papierowej wersji „Inżynierii i Budownictwa” można składać w dowolnym terminie w siedzibie redakcji. Zamawiający może otrzymać czasopismo, począwszy od następnego miesiąca po dokonaniu wpłaty. Zamówienia zeszytów sprzed terminu wpłaty będą realizowane – w miarę możliwości – z zapasów magazynowych.

Cena rocznej prenumeraty normalnej wynosi 259,20 zł (w tym 8% VAT).

Cena rocznej prenumeraty ulgowej dla członków indywidualnych PZITB, Związku Mostowców RP, PIIB oraz studentów wynosi 155,52 zł (w tym 8% VAT).

W przypadku prenumeraty ulgowej jest wymagane podanie (odpowiednio): nazwy oddziału stowarzyszenia; numeru rejestracyjnego w Okręgowej Izbie Inżynierów Budownictwa; nazwy uczelni i wydziału. Faktura za prenumeratę ulgową może być wystawiona tylko na osobę fizyczną.

Wpłaty za prenumeratę w wersji papierowej prosimy dokonywać na konto: Fundacja PZITB Inżynieria i Budownictwo, 00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14, Bank Millennium Warszawa, nr 23 1160 2202 0000 0000 5515 9052.

REKLAMY przyjmuje redakcja

Materiały opublikowane w „Inżynierii i Budownictwie” są objęte prawem autorskim i nie mogą być – bez zgody redakcji – rozpowszechniane w żadnej postaci. Redakcja nie odpowiada za treść zamieszczonych reklam.

Indeks 95132 Cena: 20,00 zł + 8% VAT
ISSN 0021-0315 (wersja pierwotna)

PRZYGOTOWANIE DO DRUKU I DRUK: Drukarnia „LOTOS Poligrafia” sp. z o.o.
www.lotos-poligrafia.pl, tel. 22-872-22-66, fax 22-872-22-68.



Rozkład naprężeń w stalowym złączu doczołowym z jednostronnymi nakładkami rombowymi określony metodą elementów skończonych

W normie PN-EN 1993-1-8: 2006 podano, że: *węzły projektuje się na podstawie realistycznych założeń co do rozkładu sił wewnętrznych i momentów, zakładając, że: siły i momenty wewnętrzne przyjmowane w analizie są w równowadze z siłami i momentami przyłożonymi do węzła*. Uwaga ta jest równoważna z zapisem normy PN-S-10052:1982, aby w mostach: *dążyć do przenoszenia sił spoinami czołowymi bez stosowania nakładek stykowych oraz stosować łagodne przejścia przy zmianie przekroju*. Sytuację pogarsza analiza wyników badań rentgenograficznych *in situ* spoin czołowych w eksploatowanych mostach na terenie Polski. Badania te przez 37 lat prowadził Zakład Konstrukcji Metalowych Politechniki Szczecińskiej (obecnie Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie).

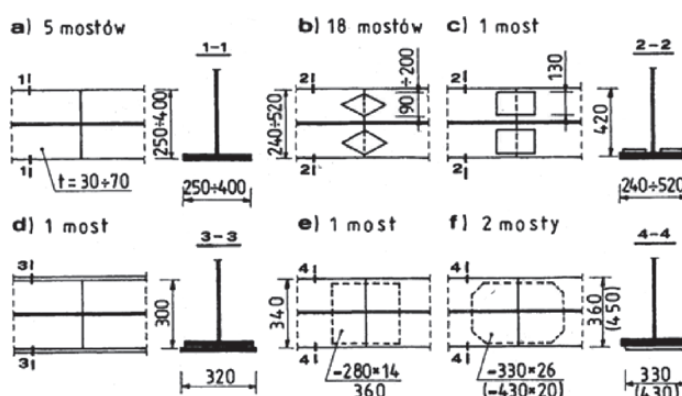
We wszystkich blachownicowych spawanych mostach kolejowych wybudowanych do czasu wybuchu II wojny światowej oraz w okresie powojennym do roku 1953 złącza doczołowe pasów i środników przykryto jedno- lub dwustronnymi nakładkami i przykładkami [10, 11, 15]. W przebadanych 155 mostach kolejowych, oprócz bardzo złej ogólnej jakości spoin czołowych (58,1% spoin miało poziom jakości powyżej poziomu D, niedopuszczalnego dla spoin poddanych obciążeniu zmęczeniowemu według PN-EN ISO 5814:2014), w 34 obiektach (21,9%) wykryto 438 złączy z pęknięciami wewnętrznymi [12]. Rozwiązania konstrukcyjne styków doczołowych w tych obiektach przedstawiono w tabl. 1. Wykazano, że w 24 mostach tej grupy (70,6%) 3518 badanych odcinków spoin było przykrytych nakładkami lub przykładkami (75,7%).

Konstrukcje tych styków w pasach dolnych 28 blachownicowych mostów przedstawiono na rys. 1. W 18 z nich złącza doczołowe są przykryte jednostronnymi nakładkami rombowymi od strony osi podłużnej dźwigarów. Nakładki rombowe mają szerokość od 90 do 200 mm i długość od 160 do 240 mm. W celu oceny trwałości tego rodzaju złączy przeprowadzono laboratoryjne badania ich wytrzymałości zmęczeniowej.

Tablica 1

Liczbowe zestawienie wykonanych radiogramów w 34 mostach z pęknięciami w złączach doczołowych bez nakładek i z nakładkami [10]

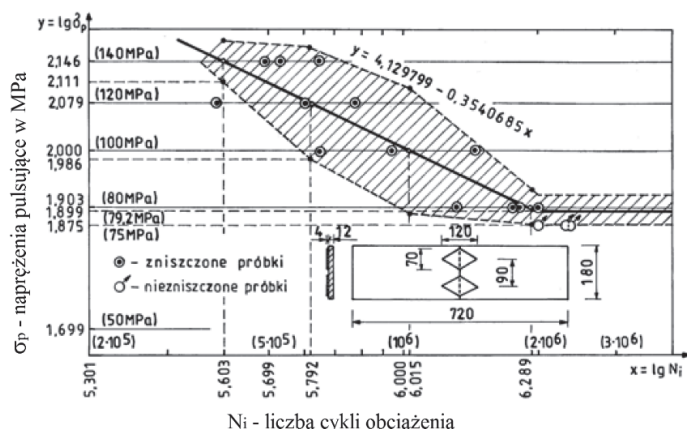
Liczba mostów	Konstrukcja złączy	Liczba radiogramów				Poziom jakości		Liczba pęknięć
		razem	elementy ściskane	elementy rozciągane	z pęknięciami	B i C	D i > D	
5		620	403	217	72	334	286	72
5		507	226	281	27	268	239	44
4		954	348	606	79	525	429	67
16		2282	1101	1181	197	766	1516	208
4		282	140	142	62	52	230	47
34	Ogółem	4645	2218	2427	437	1945	2700	438
Zestawienie łączne								
10		1127	629	498	99	602	525	116
24		3518	1589	1929	338	1343	2175	322



Rys. 1. Pasowe styki czołowe w 28 mostach blachownicowych z pęknięciami w złączach spawanych [10]

Badania zmęczeniowe złączy i ich analiza

Do badań przyjęto model złącza ze stali St3M o geometrii przedstawionej na rys. 2. Czołowe spoiny X wykonano ręcznie, stosując elektrody kwaśne EA 1.46 średnicy 3,25 i 4 mm [10, 15]. Styki wzmocniono dwiema jednostronnymi nakładkami rombowymi 70×4–120 mm,



Rys. 2. Wyniki badań 16 próbek i prosta regresji z obszarem ufnosci [10, 15]

przyspawanymi spoinami pachwinowymi $a = 2,5 \div 3$ mm. Badania wykonano zgodnie z normą PN-H-04325:1976, przy obciążeniu tętniącym rozciągającym, 5 wartościach naprężeń i współczynniku asymetrii cyklu $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,1$.

Pierwsze pęknięcia pojawiły się od strony nakładek rombów w materiale rodzimym, w przekrojach przechodzących przez ostre ich krawędzie końcowe. W trzech próbkach przy naprężeniach 80, 100 i 140 MPa pęknięcia pojawiły się na 99 000; 168 900; 20 000 cykli przed ich całkowitym rozerwaniem. Natomiast dwie próbki przy naprężeniach 80 MPa nie uległy zniszczeniu, pomimo że od momentu wystąpienia pierwszych pęknięć przy $1,82 \cdot 10^6$ i przy $1,99 \cdot 10^6$ cyklach obciążenia były dodatkowo obciążane do $3,64 \cdot 10^6$ i $2,83 \cdot 10^6$ cykli (rys. 3).

Wyniki badań zmęczeniowych ujęto w układzie podwójnie logarytmicznym (por. rys. 2). Metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono prostą regresji oraz przedziały ufnosci z prawdopodobieństwem $p = 90\%$. Określona wartość nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej w przypadku $N_f = 2 \cdot 10^6$ wynosi $Z_{79,2}$ MPa. Badania wykazały spiętrzenie naprężeń przez nakładki głównie na ich końcach. Potwierdzają to wcześniej podane wnioski, m.in. w [2, 5, 9]. Wytrzymałość zmęczeniowa wynikająca z zastosowania nakładki zależy zarówno od jej kształtu, jak i długości. Najmniejszą wartość Z_{79} osiąga się, jeżeli element dodatkowy jest skrócony do 300 mm.

W celu całościowego zobrazowania zagadnienia w tabl. 2 przedstawiono badania literaturowe problemu.



Rys. 3. Niezniszczone próbki po $3,64 \cdot 10^6$ i $2,83 \cdot 10^6$ cyklach obciążenia (pęknięcia po $1,82 \cdot 10^6$ i $1,99 \cdot 10^6$ cykli – $\sigma = 80$ MPa)

Są to badania od roku 1933 (E.H. Schulz i H. Buchholtz w [9]) do roku 1990 [5] prowadzone przy obciążeniu rozciągającym tętniącym odzerowo ($R = 0$) próbek ze stali gatunku St52. Jednocześnie w celach porównawczych oprócz badań złączy z nakładkami przedstawiono wyniki własnych badań zmęczeniowych Z_{79} ze stali St3SX, starzonej samorzutnie przez 40 lat (próbka nr 1) oraz spoin czołowych poziomu jakości B+D (stal St3M, $R = 0,1$ – próbka 2).

Powyższe dane dotyczące gatunków stali są istotne w analizie porównawczej (kol. 6 i 7, por. tabl. 2), gdyż wytrzymałość zmęczeniowa próbek [2, 7]:

- jednolitych bez karbów zwiększa się wraz z wytrzymałością statyczną,
- mających karby również zwiększa się wraz z wytrzymałością statyczną, lecz mniej intensywnie,
- spawanych jest niezależna od wytrzymałości statycznej.

Obszernie powyższe zagadnienia zostały omówione w publikacjach [2, 8, 9]. Fakt, że wytrzymałość zmęczeniowa złączy spawanych nie jest proporcjonalna do

Tablica 2
Wpływ nakładek pasowych na wytrzymałość zmęczeniową Z_{79}

Nr	Geometria próbki ¹⁾	Stal	$R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$	Wytrzymałość zmęczeniowa, MPa			Źródło wyników
				10 ⁵ cykli	2 · 10 ⁶ cykli	%	
1	2	3	4	5	6	7	8
1		St3SX	$R = 0,1$	254	145	100	[12]
2		St3M		150	125	86	[10, 11]
3		St3M		228	79	54	[10, 15]
4		St52	$R = 0$	–	280	193	[9]
5				–	90	62	
6				–	90÷100	62-69	
7		–	$R = 0$	–	90÷100 79	62-69 54	[5] [2]
8		–		234	79	54	[2]
9		–		202	80	55	
10		–		211	100	69	
11		–		239	83	57	[2] [5]
12		–		260	92	63	

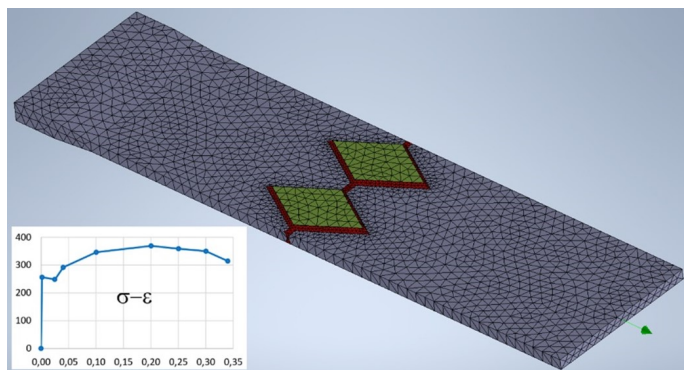
¹⁾ Nr 1, 2 i 3 – badania własne [10÷12, 15].

wytrzymałości statycznej materiału rodzimego ma istotne znaczenie dla projektantów. Przykładowo wyznaczona wartość nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej stali gatunku St3SX $Z_{79} = 145$ MPa stanowi tylko 48% jej określonej granicy plastyczności $R_{eH} = 302$ MPa. Natomiast $Z_{79} = 79$ MPa w przypadku złączy z nakładkami

rombowymi stanowi tylko 26% tej granicy. Analogicznie w odniesieniu do stali St52 $Z_{fj} = 280$ MPa stanowi 78,9% jej normowej granicy plastyczności $R_{eH} = 355$ MPa, a $Z_{fj} = 90$ MPa w przypadku złączy z nakładkami – 25,4% tej granicy. O tych faktach należy pamiętać, stosując według Eurokodu 3 zalecaną obecnie w mostach stal S355N/NL o $R_{eH} = f_y = 355$ MPa.

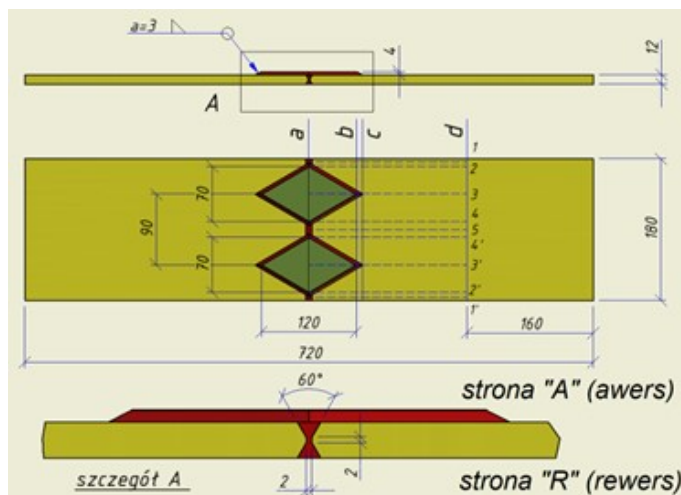
Numeryczny model złącza

W badaniach zmęczeniowych przedmiotowego złącza – rozkład naprężeń, a w szczególności ich koncentrację przyjmowano intuicyjnie. Nie można było ich określić również z rozwiązania ogólnego C.E. Inglisa [4, 14]. Autorzy postanowili określić rozkład naprężeń w złączu metodą elementów skończonych (MES). Obliczenia wykonano w programie Inventor Nastran. Zastosowano elementy skończone typu tetrahedrons, 4-ściennie (10-węzłowe) o rozmiarach 12 mm (ogólnie) z zagęszczeniem lokalnym do 4 mm w obszarach spoin i płaszczyzn styków. Należy nadmienić, że w obliczeniach wstępnych analogiczne wyniki uzyskano przy zagęszczeniu siatki do 10 mm oraz 3 mm w przypadku spoin. Przyjęty model MES z podziałem na elementy skończone pokazano na rys. 4. Uwzględniono szczelinę 0,1 mm między nakładkami rombowymi a blachą podłużną. Ponadto przedstawiono (por. rys. 4) przyjęte parametry analizowanej stali. Jest to wykres otrzymany z badań mostu na linii kolejowej 275 [3]. Most został oddany do eksploatacji 15 maja 1875 r. Został on zbudowany ze stali zlewnej niskowęglowej (Flußstahl) o $C = 0,045\%$. Według badań wartość granicy plastyczności $R_{eH} = 254$ MPa i wytrzymałości $R_m = 359$ MPa oraz $E = 197$ GPa.



Rys. 4. Model MES z podziałem na elementy skończone i parametry stali

Naprężenia obliczono w przekrojach poprzecznych $a-d$ w przypadku punktów 1–1' (rys. 5) przy założonych 5 siłach rozciągających o wartościach, które przyjęto w badaniach zmęczeniowych, czyli: $P = 162, 173, 216, 260$ i 303 kN. Siły te wywołują w blasze złącza średnie naprężenia wynoszące 75, 80, 100, 120 i 140 MPa. Oznacza to, że w przypadku każdego naprężenia wykonano w poszczególnym przekroju 9 pomiarów naprężeń, czyli w odniesieniu do 4 przekrojów $a-d$ łącznie 36 pomiarów. Ogółem przy pięciu wartościach naprężeń określono naprężenia w $5 \cdot 36 = 180$ punktach obliczeniowych z każdej strony analizowanego złącza, czyli po stronie „A” z nakładkami rombowymi (awers) i po stronie odwrotnej „R” – lewej (rewers).



Rys. 5. Konstrukcja analizowanego złącza i usytuowanie punktów pomiarowych

Analiza pomierzonych naprężeń

Określone wartości powierzchniowych naprężeń rozciągających po stronie awersu – „A” podano w tabl. 3, a po stronie rewersu – „R” w tabl. 4. Wykorzystując symetrię złącza względem osi podłużnej 5, z uwagi na lepszą czytelność tablic, w przekrojach poprzecznych $a-d$ poszczególnego σ_{max} umieszczono w jednej „klatce” wartości pomierzone na analogicznych czterech liniach z obu stron osi symetrii. Oznacza to podanie na przekrojach poprzecznych $a-d$ wartości naprężeń z punktów 1 i (1'), 2 i (2'), 3 i (3') oraz 4 i (4') (por. tabl. 3 i 4), przy czym z uwagi na lepszą przejrzystość, naprężenia z osi 1', 2', 3' i 4' podano w nawiasach. W przypadku całościowego zobrazowania zagadnienia na rys. 6 podano przykładowe rozkłady obliczonych naprężeń powierzchniowych dwóch złączy; do skrajnych złączy rozciąganych naprężeniem $\sigma_{max} = 80$ MPa oraz $\sigma_{max} = 140$ MPa i dodatkowo w tabl. 5 podano obliczone wartości pod nakładkami w przypadku tych złączy.

Przedstawione (por. tabl. 3+5) obliczone wartości rozciągających naprężeń złącza doczołowego z nakładkami rombowymi pozwalają na poniższe stwierdzenia:

- analizując wartości naprężeń w przekrojach poprzecznych d , stwierdza się obciążenie blachy złącza ciągłym poprzecznym naprężeniem rozciągającym σ_{max} równym wartościom w kol. 3 tablic 3+5;

- każdorazowo, niezależnie od wartości siły rozciągającej, w spoinie czołowej po stronie „A” średnia wartość naprężenia jest mniejsza o 23 do 43 MPa od wartości po stronie „R” (kol. 9, por. tabl. 3 i 4), lecz naprężenie średnie w spoinie ma wartość σ_{max} i w przypadku poszczególnych złączy wynosi: 76,5, 81,5, 101,5, 121 i 140,5 MPa, których odchyłki procentowe od wartości σ_{max} wynoszą od 2,0 do 0,4%;

- zróżnicowane wartości naprężeń w punktach pomiarowych na stronach „A” i „R” są wywołane zginaniem bocznym złącza;

- pod nakładkami rombowymi w punktach $a3$ i ($a3'$) oraz $b3$ i ($b3'$) (por. tabl. 4 i 5) jest zakłócona wyżej omówiona reguła, ponieważ:

- a) punkty $a3$ i ($a3'$) w przypadku $\sigma_{max} = 80$ MPa i $\sigma_{max} = 140$ MPa mają na stronach „A” i „R” wartości naprężeń 51,5 i 89 MPa oraz 93,5 i 155 MPa, czyli wartości średnie σ_{sr} są równe 70,25 i 124,25 MPa, a procentowe odchyłki od wartości σ_{max} wynoszą odpowiednio: –12,2 i –11,3%,

- b) punkty $b3$ i ($b3'$) w przypadku $\sigma_{max} = 80$ MPa i $\sigma_{max} = 140$ MPa mają dwustronne naprężenia 77,5 i 80,5 MPa

Tablica 3
Obliczone wartości naprężeń Hubera–Misesa w MPa – strona „A” (por. rys. 5)

Strona	Siła, kN	$\sigma_{\max}$, MPa	Przekrój	Wartości naprężeń σ w przekrojach a–d w punktach 1–1', MPa					σ_{sr} , MPa			$\frac{\sigma_3}{\sigma_{\max}}$ ($\sigma_3/\sigma_{\max}$)
									blacha	nakładki		
				1 i (1')	2 i (2')	3 i (3')	4 i (4')	5	1, 5, 1'	2, 3, 4	2', 3', 4'	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
„A” (awers)	162	75	a	71 (73)	45 (45)	47 (48)	42 (43)	51 –	65 –	45 –	– (45)	
			b	71 (72)	72 (72)	59 (57)	72 (72)	71 –	71 –	68 –	– (67)	
			c	72 (72)	74 (74)	125,1 (110)	74 (74)	72 –	72 –	91 –	– (86)	1,67 (1,47)
			d	76 (76)	76 (76)	76 (76)	76 (76)	76 –	76 –	76 –	– (76)	
	173	80	a	72 (79)	48 (44)	51 (51)	45 (45)	55 –	69 –	48 –	– (47)	
			b	76 (76)	77 (77)	60 (60)	76 (76)	77 –	76 –	71 –	– (71)	
			c	77 (77)	79 (79)	133,7 (118)	78 (78)	78 –	77 –	97 –	– (92)	1,67 (1,47)
			d	81 (81)	81 (81)	81 (81)	81 (81)	81 –	81 –	81 –	– (81)	
	216	100	a	90 (98)	60 (55)	64 (64)	57 (57)	70 –	86 –	60 –	– (59)	
			b	96 (95)	96 (95)	75 (76)	94 (95)	95 –	95 –	88 –	– (89)	
			c	96 (96)	96 (96)	167,6 (151)	98 (98)	97 –	96 –	121 –	– (115)	1,68 (1,51)
			d	101 (101)	101 (101)	101 (101)	101 (101)	101 –	101 –	101 –	– (101)	
	260	120	a	109 (116)	75 (75)	68 (76)	70 (70)	82 –	102 –	71 –	– (74)	
			b	115 (115)	116 (116)	92 (92)	116 (116)	114 –	115 –	108 –	– (108)	
			c	117 (116)	116 (117)	202,4 (188)	118 (117)	117 –	117 –	145 –	– (141)	1,69 (1,57)
			d	122 (122)	122 (122)	122 (122)	122 (122)	122 –	122 –	122 –	– 122	
	303	140	a	127 (133)	86 (84)	91 (91)	85 (84)	97 –	119 –	87 –	– (86)	
			b	134 (135)	135 (136)	105 (108)	135 (135)	134 –	134 –	125 –	– (126)	
			c	136 (136)	137 (137)	236,6 (220)	137 (137)	136 –	136 –	170 –	– (165)	1,69 (1,57)
			d	142 (142)	142 (142)	142 (142)	142 (142)	142 –	142 –	142 –	– (142)	

Tablica 4
Obliczone wartości naprężeń Hubera–Misesa w MPa – strona „R” (por. rys. 5)

Strona	Siła, kN	$\sigma_{\max}$, MPa	Przekrój	Wartości naprężeń σ w przekrojach a–d w punktach 1–1', MPa					σ_{sr} , MPa			$\frac{\sigma_3}{\sigma_{\max}}$ ($\sigma_3/\sigma_{\max}$)
									blacha		nakładki	
				1 i (1')	2 i (2')	3 i (3')	4 i (4')	5	1, 5, 1'	2, 3, 4	2', 3', 4'	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
„R” (rewers)	162	75	a	88 (91)	85 (89)	83 (83)	83 (83)	84 –	88 –	84 –	– (85)	
			b	72 (72)	71 (72)	72 (71)	72 (72)	72 –	72 –	72 –	– (72)	
			c	71 (71)	72 (72)	74 (75)	72 (72)	72 –	71 –	73 –	– (73)	0,99 (1,00)
			d	74 (74)	74 (74)	74 (74)	74 (74)	74 (74)	74 –	74 –	– (74)	
	173	80	a	97 (97)	96 (95)	90 (88)	89 (89)	89 –	94 –	92 –	– (91)	
			b	77 (77)	78 (78)	79 (82)	76 (78)	76 –	77 –	78 –	– (79)	
			c	76 (76)	79 (79)	72 (81)	76 (76)	76 –	76 –	76 –	– (79)	0,90 (1,01)
			d	79 (79)	79 (79)	79 (79)	79 (79)	79 –	79 –	79 –	– (79)	

cd. tablicy na str. 598

Strona	Siła, kN	$\sigma_{\max}$, MPa	Przekrój	Wartości naprężeń σ w przekrojach $a-d$ w punktach 1–1', MPa					$\sigma_{\text{śr.}}$ MPa			$\frac{\sigma_3}{\sigma_{\max}}$ ($\sigma_3'/\sigma_{\max}$)
									blacha	nakładki		
1	2	3	4	1 i (1')	2 i (2')	3 i (3')	4 i (4')	5	1, 5, 1'	2, 3, 4	2', 3', 4'	13
„R” (rewers)	216	100	a	120 (120)	116 (117)	110 (110)	112 (112)	111 –	117 –	113 –	– (113)	
			b	96 (96)	96 (96)	99 (99)	98 (98)	95 –	96 –	98 –	– (98)	
			c	95 (95)	95 (95)	100 (100)	98 (98)	95 –	95 –	98 –	– (98)	1,00 (1,00)
			d	99 (99)	99 (99)	99 (99)	99 (99)	99 –	99 –	99 –	– (99)	
	260	120	a	142 (144)	135 (136)	134 (134)	134 (134)	135 –	140 –	134 –	– (135)	
			b	115 (115)	118 (115)	119 (119)	116 (116)	114 –	115 –	118 –	– (117)	
			c	114 (114)	116 (116)	119 (119)	115 (115)	114 –	114 –	117 –	– (117)	0,99 (0,99)
			d	119 (119)	119 (119)	119 (119)	119 (119)	119 –	119 –	119 –	– (119)	
	303	140	a	165 (166)	160 (162)	154 (156)	155 (155)	156 –	162 –	156 –	– (158)	
			b	135 (132)	136 (135)	137 (138)	135 (135)	135 –	134 –	136 –	– (136)	
			c	134 (133)	135 (136)	137 (141)	135 (135)	133 –	133 –	136 –	– (137)	0,98 (1,01)
			d	138 (138)	138 (138)	138 (138)	138 (138)	138 –	138 –	138 –	– (138)	

oraz 118,5 i 137,5 MPa, czyli wartości naprężeń średnich σ_{sr} są równe 79 i 128 MPa, a procentowe odchyłki od wartości $\sigma_{\max}$ wynoszą odpowiednio: –1,3 i –8,6%;

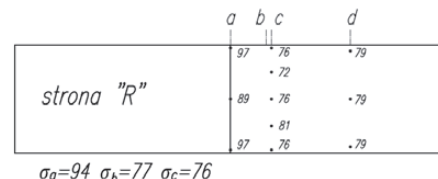
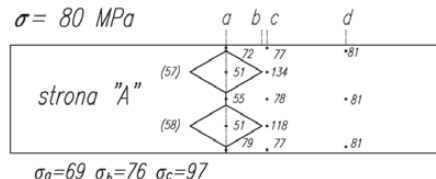
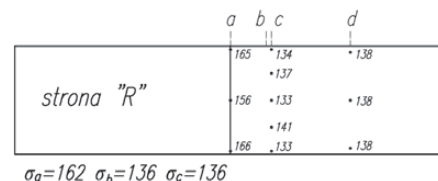
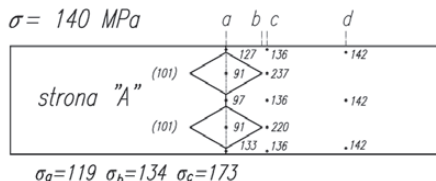
– przy powyższych uwagach nakładki rombów nie zmniejszają wartości naprężeń w spoinie czołowej, zgodnie z przyjętą zasadą wartości procentowego ilorazu ich powierzchni do powierzchni blachy równego 25,9%, natomiast pomierzone zmniejszenie naprężeń w blasze pod nakładkami to wpływ oddziaływania naprężeń skurczowych wywołanych przez spoiny pachwinowe;

– nakładki to balast konstrukcyjny? Tak, to balast!

– nakładki przejmują zwiększenie siły z przekroju c na ich końcach, wywołanej koncentracją naprężeń w punktach c3 i (c3');;

– obliczone wartości naprężenia w ich środkowej części, w punktach a3 i (a3') zależą od wartości siły rozciągającej i wynoszą od 47 do 101 MPa (por. tabl. 3 i 5), przykładowo stanowi to 63 i 72% wartości $\sigma_{\max} = 75$ i $\sigma_{\max} = 140$ MPa;

– w przypadku złączy obciążonych $\sigma_{\max} = 80$ i $\sigma_{\max} = 140$ MPa wartości naprężeń średnich w punktach 3 i (3') nakładek wynoszą: $\sigma_{sr} = 54$ i $\sigma_{sr} = 96$ MPa (por. tabl. 3 i 5), a siły rozciągające $N = 15\,120$ i $N = 26\,880$ N;

a) $\sigma = 80$ MPab) $\sigma = 140$ MPa

Rys. 6. Przykładowe rozkłady naprężeń w odniesieniu do poszczególnych stron złączy przy obciążeniu: a) $\sigma = 80$ MPa, b) $\sigma = 140$ MPa i wartości naprężenia średniego w osiach a, b, c (por. tabl. 3 i 4)

Tablica 5
Naprężenia pod nakładkami

Strona i element	Siła, kN	$\sigma_{\max}$, MPa	Przekrój	Wartość naprężeń σ w przekrojach a i b, MPa				
				1 i 1'	2 i 2'	3 i 3'	4 i 4'	5
„A” (awers) blacha	173	80	a	–	66 (66)	50 (53)	63 (60)	–
			b	–	–	81 (74)	–	–
	303	140	a	–	109 (113)	92 (95)	113 (109)	–
			b	–	–	118 (119)	–	–
„R” (rewers) nakładka	173	80	a	–	45 (50)	57 (58)	58 (48)	–
			b	–	–	65 (65)	–	–
	303	140	a	–	79 (88)	101 (101)	101 (85)	–
			b	–	–	114 (115)	–	–

– siły N są przenoszone z przekroju c na nakładki przez rzuty, na oś podłużną złącza ($\alpha = 30,25^\circ$), składowych sił ze spoin pachwinowych o wartościach: w przypadku $\sigma_{\max} = 80 \text{ MPa}$ – $N_{s1} = 2 \cdot 69 \cdot 3 \cdot 0,8637 \cdot 45 = 16\,092 \text{ N}$, a w przypadku $\sigma_{\max} = 140 \text{ MPa}$ – $N_{s2} = 30\,396 \text{ N}$, których procentowe różnice od wartości N wynoszą +6,4 i +13,1%;

– procentowe zróżnicowanie sił N i N_s jest wynikiem przyjmowania naprężeń z punktów skrajnych spoin, punktów (2, 2') i (4, 4'), a nie wartości średniej (wyjaśnienie w [13]);

– w okolicy zakończenia nakładek rombów, w punktach 3 i (3') – przekroju c , występuje koncentracja naprężeń, której współczynnik równy ilorazowi wartości naprężenia na powierzchni „A” do połączenia bez nakładek ($\sigma_{\max}$) wynosi od 1,47 do 1,69 – patrz kol. 7 i 13 (por. tabl. 3);

– niewytłumaczalna jest od 7- do 12-procentowa różnica wartości współczynnika koncentracji naprężenia z punktów 3 i (3'); prawdopodobnie przyczyna tkwi w geometrii elementów skończonych wzdłuż danej osi;

– koncentracja naprężeń jest jedną z przyczyn powstawania pęknięć w trakcie badań zmęczeniowych w punktach 3 i (3') na stronie „A” złącza; analiza w podsumowaniu.

Podsumowanie

Obliczenia MES spawanego złącza doczołowego z nakładkami rombowymi umożliwiły określenie naprężeń w poszczególnych jego przekrojach, wywołanych rozciągającymi naprężeniami o pięciu zróżnicowanych wartościach wynoszących od 75 do 140 MPa, które przyjęto w badaniach zmęczeniowych [15] (por. rys. 5). Wartości naprężeń obliczono w przypadku powierzchni strony „A” (awers) z nakładkami rombowymi i strony przeciwnej – gładkiej „R” (rewers), (por. tabl. 3÷5). Zróżnicowane ich wartości potwierdziły przewidywania autorów w odniesieniu do obliczeń złączy przyjętą metodą i wyjaśniły powstawanie jednostronnych stochastycznych pęknięć zmęczeniowych.

Wykazano, że w okolicy zakończeń nakładek rombów powstają miejsca koncentracji naprężeń. Iloraz ich maksymalnych wartości w odniesieniu do połączeń bez nakładek wynosi od 1,47 do 1,69. Fakt ten uzasadnia występowanie pęknięć zmęczeniowych, omówionych we wstępie artykułu, tj. już przy naprężeniach rozciągających $\sigma_{\max} = 80 \text{ MPa}$. Jeśli założyć, że w strefie koncentracji naprężeń (punkty $c3$ i ($c3'$), por. rys. 5) występuje globularne (kuliste) podpowierzchniowe wtrącenie niemetaliczne o najmniejszym współczynniku koncentracji niezależnym od wielkości średnicy i o wartości 2,04, to spowoduje to zwiększenie naprężeń do $\sigma = 80 \cdot 1,69 \cdot 2,04 = 275 \text{ MPa}$, które są większe od granicy plastyczności stali $R_{eH} = 254 \text{ MPa}$ [4, 6, 10].

Znaczne lokalne zwiększenie wartości naprężeń na końcach nakładek oraz dodatkowe ich zwiększenie wywołane podpowierzchniowymi wtrąceniami niemetalicznymi

(siarczki i tlenki) zależnymi od zastosowanych odtleniaczy w czasie wytopu stanowią przyczyny pęknięć występujących i omówionych w badaniach zmęczeniowych [1, 4, 15].

Całościowa analiza złącza w zaprezentowanym procesie walidacji przyjętego modelu numerycznego pozwoliła oszacować jego zaskakującą rzeczywistą „przydatność wzmocnieniową” konstrukcji. Bez spoin otworowych lub „przyklejenia” zasadność stosowania nakładek rombów jest fikcją. **Stosowanie nakładek rombów zmniejsza wytrzymałość zmęczeniową złącza Z_j o około 60%** (por. tabl. 2 i rys. 6).

Autorzy negują przedstawione rozwiązanie. Niestety, dotychczas nie doczekało się ono właściwego rozwiązania analitycznego. Planuje się rozszerzyć badania z uwzględnieniem pęknięć powierzchniowych i ich wpływu na rozkład naprężeń rzeczywistych w złączu.

Autorzy twierdzą, że zgodnie z przysłowiami łacińskimi „errare humanum est” (mylić się jest rzeczą ludzką), a jednocześnie „sapientis est mutare consilium” (człowiek rozumny nie waha się zmienić zdanie).

PIŚMIENNICTWO

- [1] Blicharski M.: Inżynieria materiałowa. Stal. WNT, Warszawa 2004.
- [2] Gurney T.R.: Zmęczenie konstrukcji spawanych. WNT, Warszawa 1973.
- [3] Hołowaty J., Wichtowski B.: Właściwości stali konstrukcyjnej mostów na linii kolejowej nr 275 – linii badań zmęczeniowych Augusta Wöhlera. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 1–2/2020.
- [4] Inglis C.E.: Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Transactions of the Institute of Naval Architects. Vol. 55, 1913.
- [5] Newmann A.: Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure. Teil 1. VEB Verlag Technik, Berlin 1990.
- [6] Heйбер Г.: Концентрация напряжений – Гостехиздат, Москва 1947.
- [7] Newman T.R., Gurney T.R.: Fatigue test on plain plate specimens and transverse butt welds. British Welding Journal, vol. 6, No. 11/1964.
- [8] Ros M.: Dwa godne uwagi mosty w Jugosławii. [W:] Polskie Archiwum Techniczne w Szwajcarii, Zurych 1944.
- [9] Stüssi F.: Entwurf und Berechnung von Stahlbauten. Springer-Verlag, Berlin (Göttingen) Heidelberg 1958.
- [10] Wichtowski B.: Wytrzymałość zmęczeniowa spawanych złączy doczołowych w stalowych mostach kolejowych. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 527. Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2002.
- [11] Wichtowski B.: Service durability of the first welded Bridges in Poland in the light of their butt joint investigation. „Archives of Civil Engineering”, vol. XLIX, No. 2/2003.
- [12] Wichtowski B.: Wpływ starzenia stali na jej wytrzymałość zmęczeniową. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 5/2009.
- [13] Wichtowski B.: Wymagania normowe dotyczące spoin pachwinowych i rozkład naprężeń w spoinach podłużnych połączeń zakładkowych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 1/2017.
- [14] Wichtowski B., Czajkowski T.: Fatigue life of railway bridge welded joints. Proc. IABSE Report Saving Buildings in Central and Eastern Europe, Berlin 1998.
- [15] Wichtowski B., Wichtowski M.: Wytrzymałość zmęczeniowa spoin czołowych z nakładkami według Eurokodu 3. „Przegląd Spawalnictwa”, nr 3/2011.

Szanowny Czytelniku!

Prezentuj na łamach czasopisma własne osiągnięcia, przemyślenia i propozycje.

Propaguj „Inżynierię i Budownictwo” w swoim środowisku.

Korzystaj z łamów czasopisma do zamieszczania ogłoszeń i artykułów sponsorowanych.

„Inżynieria i Budownictwo” jest naszym wspólnym dziełem i wspólnie za nie odpowiadamy.